中国生态农业学报 2016 年 1 月 第 24 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2016, 24(1): 8−16

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150740

长期施肥措施下土壤有机碳矿化特征研究*

马天娥[1] 魏艳春[1] 杨宪龙[1] 魏孝荣[1,2]** 王玉红[3] 郝明德[1] 张兴昌[1]

(1. 西北农林科技大学资源环境学院 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 杨凌 712100; 3. 中国科学院水利部水土保持研究所 杨凌 712100)

摘 要 研究长期不同施肥措施下旱作农田土壤有机碳的矿化特征及其温度敏感性可为加深理解土壤碳循环过程提供理论依据。本文以半干旱黄土区粮−豆轮作体系为研究对象，通过两种不同温度(15 ℃和 25 ℃)的室内培养试验，分析了长期不同施肥措施下土壤有机碳矿化的动力学特征及其温度敏感性。研究结果表明，土壤有机碳矿化速率在培养初期较高，之后缓慢下降。施肥措施和培养温度对土壤有机碳矿化均具有显著影响。与不施肥对照(CK)相比，在 15 ℃培养条件下，长期单施磷肥(P)、氮磷配施(NP)和氮磷有机肥配施(NPM)处理的土壤有机碳累积矿化量(C_{min})分别增加 41%、85%和 89%，在 25 ℃培养条件下，分别增加 7%、46%和 77%。另外，与 CK 处理相比，P、NP 和 NPM 处理土壤有机碳矿化的温度敏感性(Q_{10})分别降低 25%、21%和 6%。施肥改变了土壤有机碳矿化的动力学参数，其改变程度与施肥种类和培养温度有关。与 CK 处理相比，在 15 ℃培养条件下，P、NP 和 NPM 处理的土壤潜在矿化有机碳量(C_p)分别增加 29%、65%和 48%；在 25 ℃培养条件下，NP 和 NPM 处理的 C_p 分别增加 2%和 21%，而 P 处理则减少 36%。不同施肥处理土壤有机碳矿化速率常数(k)在 15 ℃培养条件下变化较小，在 25 ℃培养条件下则有较大幅度的增加。在 25 ℃培养条件下，C_{min} 和 C_p 随土壤有机碳和全氮含量的增加而显著增加。可见，长期施肥显著促进了半干旱黄土区粮−豆轮作体系土壤有机碳的矿化，减弱了土壤有机碳矿化的温度敏感性。

关键词 旱作农田 粮豆轮作 长期施肥 土壤有机碳矿化 温度敏感性
中图分类号: S153.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)01-0008-09

Mineralization characteristics of soil organic carbon under long-term fertilization management*

MA Tian'e[1], WEI Yanchun[1], YANG Xianlong[1], WEI Xiaorong[1,2]**, WANG Yuhong[3], HAO Mingde[1], ZHANG Xingchang[1]

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming in the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract Mineralization of soil organic carbon (SOC) is a vital link in carbon cycle in terrestrial ecosystems and has a significant effect on soil productivity and CO_2 exchange in the soil-atmosphere system. Studies on the response of SOC mineralization and its temperature sensitivity to long-term fertilization could provide essential information for the understanding of SOC dynamics in semiarid agro-ecosystems. In this paper, we analyzed the characteristics of SOC mineralization for soils collected from legume-grain rotation systems with 27 years of application history of different

* 国家自然科学基金项目(41271315, 41571296)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-13-0487)和西北农林科技大学优秀青年人才科研专项(2014YQ007)资助

** 通讯作者: 魏孝荣, 主要从事生态系统物质循环研究。E-mail: xrwei78@163.com
马天娥, 研究方向为土壤物质循环。E-mail: mate026@163.com

收稿日期: 2015−06−29 接受日期: 2015−11−05

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41271315, 41571296), the Program for New Century Excellent Talents in University of Ministry of Education of China (No. NCET-13-0487) and the Northwest A&F University Outstanding Young Talent Research Project (No. 2014YQ007).

** Corresponding author, E-mail: xrwei78@163.com

Received Jun. 29, 2015; accepted Nov. 5, 2015

fertilizers in the semiarid Loess Plateau of China. We also analyzed SOC mineralization sensitivity to temperature and its response to different fertilizations. The objective of the study was to build a deeper insight into how SOC mineralization responds to long-term fertilization in semiarid agro-ecosystems. The results showed that SOC mineralization rates were high at the initial stage and then slowly decreased at different temperature (15 ℃ and 25 ℃) and fertilization treatments. Fertilization and cultivation temperature significantly influenced SOC mineralization. Compared with the no fertilization treatment (control), long-term application of phosphorus (P), combined nitrogen and phosphorus (NP), and combined nitrogen, phosphorus manure (NPM) increased cumulative mineralized SOC (C_{min}) by 41%, 85% and 89%, respectively, at 15 ℃, and by 7%, 46% and 77%, respectively, and 25 ℃. Also compared with control, P, NP and NPM application conditions decreased SOC mineralization sensitivity to temperature by 25%, 21% and 6%, respectively. Long-term fertilization changed the parameters of SOC mineralization, which varied with fertilizer type and cultivation temperature. SOC mineralization potential (C_p) of P, NP and NPM treatments increased by 29%, 65% and 48%, respectively, compared with that of control at 15 ℃. However, at 25 ℃, C_p increased by 2% under NP condition, increased by 21% under NPM condition, and decreased by 36% under P treatment compared with that under control. SOC mineralization constant (k) varied slightly at 15 ℃, but greatly increased due to fertilization at 25 ℃. Additionally at 25 ℃, cumulative C_{min} and C_p were enhanced positively with increasing of both SOC and soil total nitrogen content. But at 15 ℃, C_{min} and C_p were barely positively correlated with SOC and soil nitrogen. In conclusion, long-term fertilization increased SOC mineralization in legume-grain rotation systems in semiarid Loess Plateau, and decreased SOC mineralization sensitivity to temperature.

Keywords Semiarid agro-ecosystem; Legume-grain rotation; Long-term fertilization; Soil organic carbon mineralization; Temperature sensitivity

土壤有机碳是土壤的重要组成部分，也是土壤质量的核心，在土壤养分供应、生物活动、生态系统物质循环以及结构和功能变化等方面意义重大[1–2]。土壤有机碳的矿化是陆地生态系统碳循环过程的重要环节，对土壤生产力的持续性和土壤–大气系统 CO_2 交换等具有显著影响[3–4]。一方面，土壤有机碳的矿化使得土壤中活性有机碳含量逐渐降低，土壤生物性质、物理性质和肥力状况等均会相应发生变化[5–6]。另一方面，有机碳矿化过程使得土壤向大气释放的 CO_2 数量增加，大气温室效应增强，气温升高反过来又促进了土壤有机碳的矿化，从而形成有机碳矿化–温度升高之间的正反馈效应[7–8]。因此，深入认识不同类型生态系统土壤有机碳的矿化特征及其影响因素对于开展土壤管理和应对气候变化等工作具有重要的实践意义[4]。

不同生态系统土壤有机碳矿化特征差异很大。吴建国等[9]对祁连山中部 4 种典型生态系统的研究表明，高寒草甸和山地森林的土壤有机碳矿化速率和土壤有机碳矿化速率比例均显著高于荒漠草原。另外，土壤管理措施也会影响有机碳的矿化。代景忠等[10]研究发现，草地封育后会降低土壤有机碳的矿化速率和温度敏感性；张旭博等[11]研究发现，施肥显著提高了土壤微生物量碳和可溶性有机碳含量，进而提高了土壤有机碳的矿化速率和矿化量。此外，土壤有机碳的矿化也受环境因素和土壤性质的影响。在环境因素中，温度是影响土壤有机碳矿化的主要因子[12–13]。温度通过影响根系和微生物的代谢活动以及各种酶的活性控制土壤有机碳的分解[14–15]。在一定范围内，土壤有机碳的累积矿化量和矿化速率均随温度的升高而增加。温度对土壤有机碳矿化的影响通常用温度敏感性(Q_{10})表示。Q_{10} 表示温度每升高 10 ℃时，土壤呼吸速率增加的倍数[12,16]。目前，关于土壤有机碳矿化的温度敏感性问题，研究者已开展了大量的研究。例如，吴建国等[17]通过 61 d 的室内培养试验发现，祁连山北坡云杉(*Picea asperata*)林和草甸土壤有机碳矿化的 Q_{10} 变化范围为 1~2。Bond-Lamberty 等[18]的研究结果表明，全球尺度土壤呼吸的 Q_{10} 介于 1.5 左右。然而，这些研究主要集中在自然生态系统，对于人为干预频繁的旱作农田生态系统关注较少。施肥作为农田生态系统的一个重要管理措施，可以显著影响土壤有机碳的含量[19]。例如，焦晓光等[20]研究了连续 28 年施用不同肥料后黑土和暗棕壤的土壤养分特征，结果表明，与不施肥对照相比，各施肥处理均显著增加土壤有机质和氮磷钾养分含量。此外，施肥措施还可以改变有机碳的组成和存在状态[21]，从而对有机碳的矿化产生影响。因此，亟需开展长期不同施肥措施下土壤有机碳矿化特征和温度敏感性的研究。

粮–豆轮作体系是半干旱黄土区被广泛采用的一种种植制度。与作物连作相比，粮–豆轮作可以增强土壤碳汇功能和农田生态系统的生物多样性[22]，对于该区域粮食生产和畜牧业发展意义重大。本文以粮–豆轮作种植体系为研究对象，采集土壤样品进行两种不同温度(15 ℃和 25 ℃)的室内矿化培养

试验，研究了长期不同施肥措施下土壤有机碳的矿化特征、温度敏感性以及土壤有机碳矿化与土壤碳氮之间的关系，以期为该区域土壤有机碳的管理和未来气候变化情景下预测土壤有机碳变化提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在中国科学院长武黄土高原农业生态试验站进行。试验站成立于 1984 年，位于陕西省长武县，海拔 1 200 m。研究区为典型的黄土高原沟壑区，土壤类型为黄盖黑垆土，成土母质为马兰黄土。气候类型为暖温带半湿润大陆性季风气候，年日照时数 2 226.5 h，日照百分率 51%，年总辐射 483.7 kJ·cm^{-3}，年均气温 9.2 ℃，塬面全年>0 ℃积温为 3 029 ℃，多年平均无霜期 171 d；年降雨量 578 mm，年内降雨主要集中在 7—9 月份，占全年降雨量的 53%。试验开始时测得土壤的基本理化性状为：有机碳 6.09 g·kg^{-1}，全氮 0.8 g·kg^{-1} 和全磷 0.7 g·kg^{-1}。

1.2 试验设计

长武黄土高原农业生态试验站长期定位试验布设于 1984 年，包括不同作物种植系统(玉米连作、小麦连作、苜蓿连作、粮豆轮作)和施肥处理。本研究选取粮–豆 3 年轮作种植系统进行研究。试验共包含 4 个施肥处理，分别为：不施肥(CK)、单施磷肥(P)、氮磷肥配施(NP)和氮磷有机肥配施(NPM)。每个处理重复 3 次，共 12 个小区。小区长 10.3 m，宽 6.5 m。作物轮作方式为豌豆–小麦–小麦+糜子。施用的氮肥为尿素，磷肥为过磷酸钙，有机肥为牛粪。P 处理施肥量为 26.2 kg(P_2O_5)·hm^{-2}·a^{-1}，NP 处理施肥量为 120 kg(N)·hm^{-2}·a^{-1}+26.2 kg(P_2O_5)·hm^{-2}·a^{-1}，NPM 处理施肥量为 120 kg(N)·hm^{-2}·a^{-1}+26.2 kg(P_2O_5)·hm^{-2}·a^{-1}+75 t·hm^{-2}·a^{-1}(牛粪)。有机肥中有机碳、全氮和全磷含量分别为 17.68 g·kg^{-1}、1.97 g·kg^{-1} 和 0.97 g·kg^{-1}。肥料于作物播种前撒施于地表，然后翻耕土壤。其中，不同施肥处理土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 不同施肥处理土壤的基本理化性质
Table 1 Basic physicochemical properties of soils under different fertilizer treatments

处理 Treatment	pH	有机碳 Organic carbon (g·kg^{-1})	全氮 Total nitrogen (g·kg^{-1})	全磷 Total phosphorus (g·kg^{-1})	速效磷 Olsen phosphorus (mg·kg^{-1})	速效钾 Available potassium (mg·kg^{-1})	碱解氮 Alkali-hydrolysis nitrogen (mg·kg^{-1})
CK	7.85	8.37	0.75	0.68	2.84	149.88	38.71
P	7.83	8.98	0.79	0.91	25.12	140.11	41.21
NP	7.82	10.07	0.95	0.93	18.85	142.79	55.07
NPM	7.80	13.19	1.21	1.06	47.28	301.67	72.24

CK：不施肥；P：单施磷肥；NP：氮磷肥配施；NPM：氮磷有机肥配施。下同。CK: no fertilization; P: single application of 26.2 kg(P_2O_5)·hm^{-2}·a^{-1}; NP: combined application of 120 kg(N)·hm^{-2}·a^{-1} and 26.2 kg(P_2O_5)·hm^{-2}·a^{-1}; NPM: combined application of 120 kg(N)·hm^{-2}·a^{-1}, 26.2 kg(P_2O_5)·hm^{-2}·a^{-1} and 75 t(cow manure)·hm^{-2}·a^{-1}. The same below.

1.3 样品采集与处理

于 2011 年 9 月在每个小区内按“S”形随机采集 5 个点 0~20 cm 土层土壤样品并组成混合样品，带回实验室风干后，剔除凋落物、植物根系等杂物。其中，一部分土样研磨过 2.0 mm 筛供矿化培养用；另一部分土样研磨过 0.25 mm 筛以供土壤有机碳和全氮的测定。土壤有机碳用重铬酸钾外加热法测定，全氮用凯氏定氮法测定[23]。

1.4 土壤有机碳矿化培养试验

本试验采用室内恒温培养、碱液吸收法测定土壤有机碳的矿化量。具体步骤为：称取 10.0 g 土壤样品于 250 mL 玻璃组培瓶中，并使其均匀覆盖底部，然后用蒸馏水调节水分含量达到田间持水量的 60%；将盛有 5 mL 0.5 mol·L^{-1} NaOH 溶液的卡口瓶小心地放置于组培瓶内，并将组培瓶加盖密封，分别置于 15 ℃和 25 ℃的生化培养箱中恒温培养(每处理均 3 次重复)。于培养后的第 2 d、4 d、8 d、15 d、22 d、29 d、36 d、43 d、50 d 和 57 d 取出吸收瓶，将其中的溶液完全转移到 250 mL 三角瓶中。然后，加入 1 mol·L^{-1} $BaCl_2$ 溶液 2 mL 及 2 滴酚酞指示剂，用 0.5 mol·L^{-1} 的盐酸溶液滴定至红色消失，根据 CO_2 的释放量计算培养期内不同处理的土壤有机碳矿化量。培养过程中，用称重法定期校正土壤含水量。同时每个温度下设置 6 个不加土样的组培瓶作为空白对照。

1.5 数据分析

土壤 CO_2-C 的累积过程符合一级反应动力学方程，因此采用一级动力学方程对有机碳累积矿化量进行拟合，其表达式为：

$$C_{\min}=C_{\rm p}(1-{\rm e}^{-kt}) \tag{1}$$

式中：$C_{\min}$ 为经过 t(d)时间后土壤有机碳的累积矿化量(g·kg^{-1})，$C_{\rm p}$ 为土壤潜在矿化有机碳量(g·kg^{-1})，k 为

有机碳矿化速率常数(d^{-1}), t 为培养天数(d)。

本试验中数据的方差分析与作图采用 JMP 软件(v10.0)和 SigmaPlot 12.5 进行。

2　结果与分析

2.1　不同施肥处理土壤有机碳的矿化特征

两种培养温度下不同施肥处理土壤有机碳矿化速率(v)随培养时间的动态变化如图 1 所示。培养初期, 土壤有机碳矿化速率(v)迅速升高, 并在第 2 d 左右达到高峰, 之后随着培养时间的延长而缓慢下降。至第 57 d 培养结束时, NPM 处理在 15 ℃下其土壤有机碳矿化速率(v)为 0.028 $g\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$, 分别是 NP、P 和 CK 处理的 1.02 倍、1.34 倍和 1.89 倍, 在 25 ℃下为 0.041 $g\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$, 分别是 NP、P 和 CK 处理的 1.21 倍、1.66 倍和 1.77 倍。土壤有机碳矿化速率(v)在两个培养温度下均呈现 NPM>NP>P>CK 的趋势, 表明施肥有利于土壤有机碳矿化速率的提高。

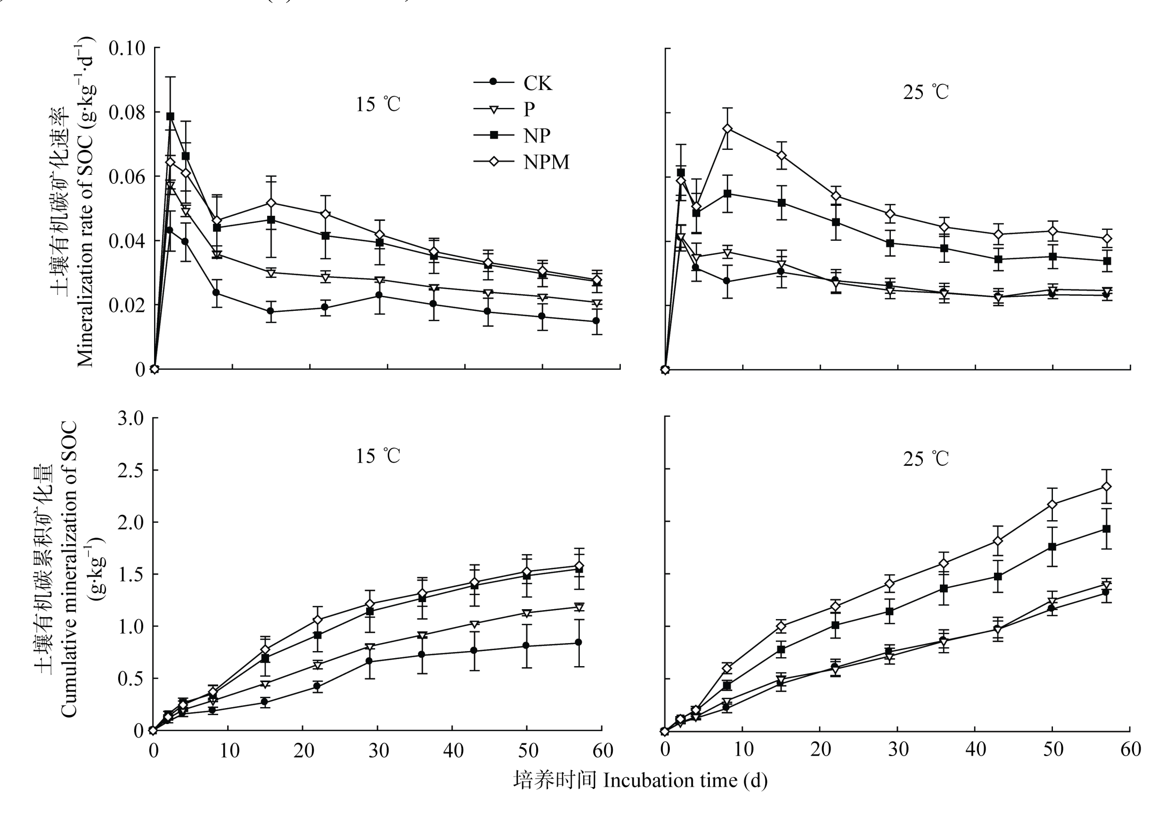


图 1　两种培养温度下不同施肥处理土壤有机碳(SOC)的矿化速率(v)及累积矿化量(C_{min})

Fig. 1　Mineralization rate and cumulative mineralization of soil organic carbon (SOC) for different fertilization treatments under two cultivation temperatures

从图 1 可以看出, 两个培养温度下(15 ℃和 25 ℃), 不同施肥处理土壤在前 22 d 其有机碳累积矿化量(C_{min})增加较快, 从第 22 d 开始至培养结束时增加较为缓慢。另外, 在两个培养温度下, 土壤有机碳累积矿化量(C_{min})也呈现出 NPM>NP>P>CK 的趋势。方差分析结果表明, 在 15 ℃培养温度下, NPM 和 NP 处理土壤有机碳矿化速率(v)和累积矿化量(C_{min})均显著高于 CK 处理($P<0.05$), 但两者之间差异不显著($P>0.05$); 在 25 ℃培养温度下, NPM 处理土壤有机碳矿化速率(v)和累积矿化量(C_{min})均显著高于 P 处理和 CK 处理($P<0.05$), P 处理和 CK 处理之间没有显著差异($P>0.05$), 同时 NP 处理土壤有机碳矿化速率(v)和累积矿化量(C_{min})也显著高于 CK 处理($P<0.05$)。

2.2　不同施肥处理土壤有机碳累积矿化量

在本试验 57 d 的培养期内, 土壤有机碳累积矿化量(C_{min})介于 1.0~2.8 $g\cdot kg^{-1}$, 矿化碳(C_{min})占有机碳(C_0)的比例(C_{min}/C_0)介于 0.11~0.23, 且 25 ℃培养条件下的 C_{min} 和 C_{min}/C_0 均显著高于 15 ℃($P<0.05$)(图 2)。CK、P、NP 和 NPM 处理在 25 ℃培养条件下的 C_{min} 较 15 ℃培养条件下分别提高 57%、19%、24%和 47%, 各处理的 C_{min}/C_0 较 15 ℃培养条件下分别提高 73%、20%、22%和 47%。与 CK 相比, 长期单施 P、NP 和 NPM 使 C_{min} 在 15 ℃时分别增加 41%、85%和 89%($P<0.05$), 在 25 ℃时分别增加 7%、46%和 77%($P<0.05$)。方差分析表明, 两个温度下, 不同施肥处理之间矿化碳占有机碳的比例(C_{min}/C_0)差异均不显著($P>0.05$)。

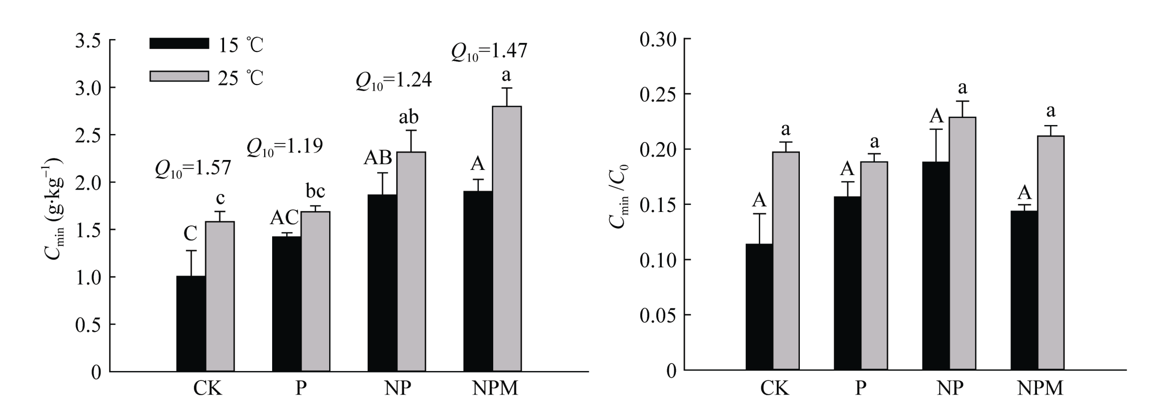


图 2 两种培养温度下不同施肥处理土壤有机碳累积矿化量(C_{min})和矿化碳占有机碳的比例(C_{min}/C_0)

Fig. 2 Cumulative mineralization of soil organic carbon (C_{min}) and ratio of mineralized carbon to total organic carbon (C_{min}/C_0) for different fertilization treatments under two cultivation temperatures

大、小写字母分别表示 15 ℃和 25 ℃下不同施肥处理间 C_{min} 或 C_{min}/C_0 的比较，不同字母表示差异显著(P<0.05, α=0.05)。Uppercase and lowercase letters mean comparison results of C_{min} and C_{min}/C_0 at 15 ℃ and 25 ℃, respectively, under different fertilizer treatments; different letters mean significant difference (P < 0.05, α = 0.05).

本研究中，土壤有机碳矿化的 Q_{10} 介于 1.19~1.57。P、NP 和 NPM 处理土壤有机碳矿化的 Q_{10} 分别较 CK 处理降低 25%、21%和 6%。可见，对于半干旱黄土区粮豆轮作种植系统而言，长期施肥可以降低土壤有机碳矿化的温度敏感性。

2.3 不同施肥处理土壤有机碳矿化的动力学特征

研究结果表明，施肥改变了土壤有机碳矿化的动力学特征参数，但改变程度与施肥种类和培养温度有关(表 2)。在 15 ℃培养条件下，各处理土壤潜在矿化有机碳量(C_p)介于 1.50~2.48 g·kg^{-1}，占土壤有机碳总量(C_0)的 17%~25%。与 CK 处理相比，P、NP 和 NPM 处理的 C_p 分别增加 29%、65%和 48%，但差异不显著(P>0.05)。在 25 ℃培养条件下，各处理土壤的 C_p 介于 1.73~3.26 g·kg^{-1}，占 C_0 的 19%~34%。与 CK 处理相比，NP 和 NPM 处理的 C_p 分别增加 2%和 21%(P>0.05)，而 P 处理则减少 36%(P>0.05)。此外，CK、NP 和 NPM 处理的 C_p 在 25 ℃培养条件下较 15 ℃培养条件下分别提高 80%、12%和 46%，而 P 处理则降低 11%。C_p/C_0 呈现出与 C_p 相似的变化趋势。不同施肥处理对 C_p/C_0 值无显著影响(P>0.05)，而培养温度对土壤 C_p 和 C_p/C_0 值均有显著影响(P<0.05)。此外，不同施肥处理土壤有机碳矿化速率常数 k 在 15 ℃培养条件下变化较小，在 25 ℃条件下则有较大幅度增加，但差异不显著(P>0.05)。同时培养温度对土壤 k 值没有显著影响(P>0.05)。

表 2 不同施肥处理不同温度下土壤有机碳矿化的一级动力学参数及 C_p/C_0 值

Table 2 Parameters of the first-order kinetics and C_p/C_0 values for soil organic carbon mineralization at different temperatures for different fertilization treatments

处理 Treatment	15 ℃			25 ℃		
	C_p (g·kg^{-1})	C_p/C_0	k (d^{-1})	C_p (g·kg^{-1})	C_p/C_0	k (d^{-1})
CK	1.50±0.54a	0.17±0.06a	0.027±0.006a	2.70±0.02ab	0.34±0.01a	0.014±0.002a
P	1.95±0.01a	0.21±0.01a	0.023±0.001a	1.73±0.32b	0.19±0.03b	0.027±0.002a
NP	2.48±0.10a	0.25±0.02a	0.029±0.007a	2.77±0.14ab	0.28±0.02ab	0.027±0.005a
NPM	2.23±0.06a	0.17±0.01a	0.036±0.006a	3.26±0.43a	0.25±0.02ab	0.028±0.004a

C_p 表示土壤潜在矿化有机碳量，C_0 表示土壤有机碳含量，k 表示有机碳矿化速率常数。同列数据后不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。C_p is potential mineralization amount of soil organic carbon. C_0 is content of soil organic carbon. k is constant of mineralization rate of soil organic carbon. Values followed by different letters in the same column are significantly different among treatments (P < 0.05).

2.4 有机碳矿化对土壤碳氮含量的依赖特征

通过分析土壤有机碳矿化特征以及矿化动力学参数与土壤碳、氮含量之间的关系发现，不同培养温度下 C_{min}/C_0、C_p/C_0 和 k 均不受土壤有机碳、全氮含量以及碳氮比的影响(P>0.05)，C_{min} 和 C_p 也不受碳氮比的影响(P>0.05)。但是，C_{min} 和 C_p 与土壤有机碳和全氮含量的关系则与温度有关(表 3)。C_{min} 和 C_p 随土壤有机碳和全氮含量的增加而增加，这种增加关系在 15 ℃培养温度下不显著(P>0.05)，而在 25 ℃培养温度下分别达到极显著(P<0.01)和显著水平(P<0.05)(表 3)，表明低温条件下土壤有机碳的矿化不受土壤有机碳和全氮含量的限制，而在较高温度下则受限制。

表 3　不同温度下土壤 C_0、N_0、C/N 与土壤有机碳矿化参数间的相关性

Table 3　Correlation coefficients between soil C_0, N_0, C/N and parameters of soil organic carbon mineralization at different temperatures

土壤性质 Soil property	温度 Temperature (℃)	C_{min}		C_{min}/C_0		C_p		C_p/C_0		k	
		r	P	r	P	r	P	r	P	r	P
C_0	15	0.52	0.126 9	−0.09	0.806 4	0.39	0.264 8	−0.25	0.482 8	0.36	0.306 5
	25	0.92	<0.000 1	0.37	0.263 8	0.64	0.034 3	−0.10	0.769 6	0.39	0.241 7
N_0	15	0.57	0.082 9	0.00	0.990 4	0.40	0.258 6	−0.23	0.517 5	0.46	0.183 9
	25	0.94	<0.000 1	0.47	0.146 7	0.66	0.026 7	−0.04	0.898 3	0.39	0.239 1
C/N	15	−0.38	0.284 0	−0.30	0.406 6	−0.11	0.769 0	0.03	0.934 8	−0.52	0.124 8
	25	−0.02	0.950 3	−0.37	0.264 1	−0.06	0.860 9	−0.26	0.445 6	0.05	0.884 6

C_0和 N_0分别表示土壤有机碳含量和土壤全氮含量。$P<0.01$ 和 $P<0.05$ 分别表示相关性达 0.01 和 0.05 显著水平。C_0 and N_0 indicate soil organic carbon content and total nitrogen content, respectively. $P < 0.01$ and $P < 0.05$ mean significant correlation at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

3　讨论与结论

粮–豆轮作体系作为半干旱黄土区广泛采用的一种种植制度，与作物连作相比，可以增强土壤碳汇功能和农田生态系统的生物多样性[22]，对于该区域粮食生产和畜牧业发展意义重大。本研究结果表明，不同施肥处理土壤有机碳矿化量均随温度的升高而增加，这与其他研究者的报道一致。Zak 等[24]研究发现，美国硬木林土壤在 25 ℃培养温度下的土壤有机碳矿化量显著高于 15 ℃和 5 ℃；黄耀等[25]报道，当培养温度从 12 ℃升高到 24 ℃时，30 d 培养时段内土壤有机碳的分解量增加 1.83~2.09 倍；刘燕萍等[26]研究发现，当温度从 15 ℃升高到 25 ℃时，水田和林地土壤有机碳矿化释放的 CO_2-C 累积量分别增加 157.8%和 135.8%。同时，研究者关于温度对土壤有机碳矿化的促进作用也做出了较为一致的解释。Kirschbaum[15]认为，在一定范围内，温度升高后土壤有机碳矿化量的增加可能与土壤微生物和酶类活性的增强有关。Rustad 等[27]发现，在一定范围内温度升高有利于微生物群落的生长和繁衍，提高了微生物的活性；冯瑞芳等[28]研究表明，温度升高显著增加了土壤有机层和矿质土壤层的酶活性，并且土壤有机层的转化酶、硝酸还原酶和脲酶活性增加更显著。随着土壤微生物和酶类活性的增强，土壤中有机质的分解过程加剧，有机碳矿化速率增加，矿化量亦随之增加。

本研究中，两个培养温度下各处理土壤有机碳累积矿化量均呈现 NPM>NP>P>CK 的趋势。一方面，这可能是因为长期施肥可以促进植物生长，增加植物根系生物量和分泌物的种类和数量，从而增加土壤中可用于矿化的活性有机碳的数量[29]。另一方面，长期施肥也可以增加土壤氮素含量，而氮含量的增加可以促进土壤中原有有机碳的矿化[30]。虽然半干旱黄土区农业生态系统主要的养分限制因子是氮素[31]，单施磷肥很少促进植物生长，甚至会降低作物产量[32]。然而，本研究所涉及的种植系统有豆科作物参与，而 P 肥的施用可以促进豆科植物固氮[33]，从而增加土壤氮素含量。在本研究的粮–豆轮作系统中，单施磷肥可以使土壤氮素增加 12%，从而促进土壤有机碳的矿化。此外，有机肥中含有大量的有机碳和多样的生物活性物质(微生物、酶等)[34]，这些物质不但能够提供更多的可矿化碳，还能加速土壤中新输入的和原有有机碳的矿化。考虑到作物地上部与地下部生物量之间的显著相关关系[35]，我们认为 NPM 处理对根系生物量及分泌物的增加作用也应该大于 NP 处理。这与唐海明等[36]的研究结果一致，也解释了本研究中 NPM 处理土壤有机碳矿化量显著高于其他处理的原因。然而，需要指出的是，NPM 处理施用有机肥中的有机碳也参与了矿化过程，因此在今后的研究中应该对土壤中原有有机碳和新输入有机碳的矿化加以区分。

土壤有机碳矿化受土壤管理措施、环境因素和土壤性质等因素的影响，其中，土壤有机碳矿化的温度敏感性问题已成为近年的研究热点。Q_{10} 表示温度每升高 10 ℃时，土壤呼吸速率增加的倍数[12,16]。Hamdi 等[37]对小麦–高粱–牧草轮作系统的研究表明，土壤有机碳矿化的 Q_{10} 介于 1.7~1.8。吴建国等[17]通过 61 d 的室内培养试验发现，祁连山北坡云杉林和草甸土壤有机碳矿化的 Q_{10} 变化范围为 1~2。本研究中，土壤有机碳矿化的 Q_{10} 介于 1.19~1.57，这与国内外其他研究者的结果相近。另外，不同施肥处理 Q_{10} 值的变化顺序为 CK>NPM>NP>P。可见，对于半干旱黄土区粮豆轮作种植系统而言，长期施肥降低了土壤有机碳矿化的温度敏感性，从而减缓了土壤 CO_2 释放–气温升高之间的正反馈效应[7]。

本研究中，NP 和 NPM 处理对土壤有机碳矿化

动力学特征的影响与其他研究结果一致[24,38]，但是 P 处理的影响则与其他研究结果相反，这可能与土壤有机碳矿化的底物供应有关。NP 和 NPM 处理显著增加了土壤中活性有机碳的含量[39]，增强了有机碳矿化的底物供应; P 处理对土壤微生物碳源利用和功能多样性的影响是多个因素综合作用的结果，受土壤采集方式、磷肥施用持续时间和试验条件等多个因素的影响。例如，已有研究表明，短期磷施用增加了土壤微生物对碳源的利用和功能多样性，而长期磷施用在很大程度上则降低了其对土壤碳源的利用和功能多样性[40]。本研究是在长期定位施肥条件下进行，所以 P 处理对土壤活性有机碳的增加作用较小，而且在温度较高时，这些新增加的活性有机碳与土壤中细颗粒结合作用较强[41]，其有效性有所降低，底物限制较为明显。此外，土壤有机碳矿化速率常数的变化也证明了底物供应的作用。本试验中，P 处理土壤有机碳矿化速率常数(k)随温度的升高而增加，而其他处理均随温度的升高而降低；另外，不同施肥处理土壤有机碳矿化速率常数在 15 ℃培养条件下变化较小，而在 25 ℃条件下则有较大幅度增加。这些结果均表明，土壤有机碳矿化在温度较低时不受底物限制，而在温度较高时则受到底物限制。在本研究中，不同培养温度和不同培养时间段，NPM、NP 和 P 处理土壤有机碳累积矿化量均高于 CK 处理，表明施用化肥或有机肥促进了土壤有机碳的矿化。然而，长期施肥使土壤有机碳库容明显增加，矿化碳占有机碳的比例(C_{min}/C_0)却并没有显著增加。因此，施用化肥或有机肥更有利于土壤有机碳的固持。

参考文献 References

[1] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, et al. Labile soil organic matter as influenced by cropping practices in an arid environment[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(12): 1647–1656

[2] Janzen H H, Campbell C A, Ellert B H, et al. Soil organic matter dynamics and their relationship to soil quality[C]//Gregorich E G, Carter M R. Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health. Development in Soil Science 25. The Netherlands: Elsevier, 1997: 277–291

[3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623–1627

[4] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7–20

[5] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 等. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 513–519
Wang Q K, Wang S L, Feng Z W, et al. Active soil organic matter and its relationship with soil quality[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 513–519

[6] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544–552
Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 544–552

[7] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. Nature, 2001, 413(6856): 622–625

[8] Dorrepaal E, Toet S, Van Logtestijn R S P, et al. Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic[J]. Nature, 2009, 460(7255): 616–619

[9] 吴建国, 艾丽, 苌伟. 祁连山中部四种典型生态系统土壤有机碳矿化及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2007, 26(11): 1703–1711
Wu J G, Ai L, Chang W. Soil organic carbon mineralization and its affecting factors under four typical vegetations in mid Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(11): 1703–1711

[10] 代景忠, 卫智军, 何念鹏, 等. 封育对羊草草地土壤碳矿化激发效应和温度敏感性的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(12): 1226–1236
Dai J Z, Wei Z J, He N P, et al. Effect of grazing enclosure on the priming effect and temperature sensitivity of soil C mineralization in *Leymus chinensis* grasslands, Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012, 36(12): 1226–1236

[11] 张旭博, 徐明岗, 林昌虎, 等. 施肥对红壤有机碳矿化特征的影响[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(6): 99–102
Zhang X B, Xu M G, Lin C H, et al. Effect of fertilization on mineralization characteristics of organic carbon in red soil[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2011, 39(6): 99–102

[12] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO_2 efflux on temperature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2): 155–165

[13] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(6): 753–760

[14] 王宪伟, 李秀珍, 吕久俊, 等. 温度对大兴安岭北坡多年冻土湿地泥炭有机碳矿化的影响[J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 591–597
Wang X W, Li X Z, Lü J J, et al. Effects of temperature on the carbon mineralization of peat in the permafrost wetland in the Da Hing'an Mountains[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(3): 591–597

[15] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of organic-matter decomposition-still a topic of debate[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(9): 2510–2518

[16] Winkler J P, Cherry R S, Schlesinger W H. The Q_{10} relationship of microbial respiration in a temperate forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(8): 1067–1072
[17] 吴建国，艾丽，朱高，等. 祁连山北坡云杉林和草甸土壤有机碳矿化及其影响因素[J]. 草地学报, 2007, 15(1): 20–28
Wu J G, Ai L, Zhu G, et al. Mineralization of soil organic carbon and its motivating factors to the dragon spruce forest and alpine meadows of the Qilian Mountains[J]. Acta Agrestia Sinica, 2007, 15(1): 20–28
[18] Bond-Lamberty B, Thomson A. Temperature-associated increases in the global soil respiration record[J]. Nature, 2010, 464(7288): 579–582
[19] 李小涵，郝明德，王朝辉，等. 农田土壤有机碳的影响因素及其研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(3): 176–181
Li X H, Hao M D, Wang Z H, et al. Factors affecting soil organic carbon in cropland and their regulation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(3): 176–181
[20] 焦晓光，魏丹，隋跃宇. 长期施肥对黑土和暗棕壤土壤酶活性及土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 698–703
Jiao X G, Wei D, Sui Y Y. Effects of long-term fertilization on the soil enzyme activities and soil nutrients of the black and dark brown soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(3): 698–703
[21] Malhi S S, Harapiak J T, Nyborg M, et al. Total and light fraction organic C in a thin Black Chernozemic grassland soil as affected by 27 annual applications of six rates of fertilizer N[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 66(1): 33–41
[22] 李小涵，王朝辉，郝明德，等. 黄土高原旱地不同种植模式土壤碳特征评价[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 325–330
Li X H, Wang Z H, Hao M D, et al. Evaluation on soil carbon contents under different cropping systems on dryland in Loess Plateau[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(S2): 325–330
[23] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京：中国农业出版社, 2005: 263–270
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 263–270
[24] Zak D R, Holmes W E, Macdonald N W, et al. Soil temperature, matric potential and the kinetics of microbial respiration and nitrogen mineralization[J]. Soil Science Society America Journal, 1999, 63(3): 575–584
[25] 黄耀，刘世梁，沈其荣，等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 709–714
Huang Y, Liu S L, Shen Q R, et al. Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 709–714
[26] 刘燕萍，唐英平，卢茜，等. 温度和土地利用变化对土壤有机碳矿化的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(7): 3896
Liu Y P, Tang Y P, Lu Q, et al. Effects of temperature and land use change on soil organic carbon mineralization[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(7): 3896
[27] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. Oecologia, 2001, 126(4): 543–562
[28] 冯瑞芳，杨万勤，张健，等. 模拟大气 CO_2 浓度和温度升高对亚高山冷杉(Abies faxoniana)林土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(10): 4019–4026
Feng R F, Yang W Q, Zhang J, et al. Effects of simulated elevated atmospheric CO_2 concentration and temperature on soil enzyme activity in the subalpine fir forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4019–4026
[29] 王玲莉，娄翼来，石元亮，等. 长期施肥对土壤活性有机碳指标的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 752–755
Wang L L, Lou Y L, Shi Y L, et al. Long-term fertilization on indicators of soil active organic carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(4): 752–755
[30] 李世清，李生秀，邵明安，等. 半干旱农田生态系统长期施肥对土壤有机氮组分和微生物体氮的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(6): 859–864
Li S Q, Li S X, Shao M A, et al. Effects of long-term application of fertilizers on soil organic nitrogen components and microbial biomass nitrogen in semiarid farmland ecological system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(6): 859–864
[31] 李生秀. 中国旱地农业[M]. 北京：中国农业出版社, 2004: 308–324
Li S X. Dryland Agriculture in China[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2004: 308–324
[32] 李芳林，郝明德，杨晓，等. 黄土旱塬施肥对土壤水分和冬小麦产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(1): 154–157
Li F L, Hao M D, Yang X, et al. Effects of fertilization on soil water and winter wheat yield in dry land of loess plateau[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(1): 154–157
[33] Raghothama K G. Phosphate acquisition[C]//Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology. New Jersey: Rutgers University, 1999: 665–693
[34] 刘恩科，赵秉强，李秀英，等. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2008, 32(1): 176–182
Liu E K, Zhao B Q, Li X Y, et al. Biological properties and enzymatic activity of arable soils affected by long-term different fertilization systems[J]. Journal of Plant Ecology (Chinese Version), 2008, 32(1): 176–182
[35] 苗果园，高志强，张云亭，等. 水肥对小麦根系整体影响及其与地上部相关的研究[J]. 作物学报, 2002, 28(4): 445–450
Miao G Y, Gao Z Q, Zhang Y T, et al. Effect of water and fertilizer to root system and its correlation with tops in wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2002, 28(4): 445–450
[36] 唐海明，汤文光，殷玉梁，等. 南方丘陵红壤旱地不同施肥模式对春玉米生物学特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(4): 107–111
Tang H M, Tang W G, Yin Y L, et al. Effects of different fertilization modes on biological characteristics and yield of spring maize in hilly red soil upland in southern China[J].

Journal of Maize Sciences, 2013, 21(4): 107–111

[37] Hamdi S, Chevallier T, Ben Aïssa N, et al. Short-term temperature dependence of heterotrophic soil respiration after one-month of pre-incubation at different temperatures[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(9): 1752–1758

[38] 倪进治，徐建民，谢正苗．土壤生物活性有机碳库及其表征指标的研究[J]．植物营养与肥料学报，2001，7(1): 56–63

Ni J Z, Xu J M, Xie Z M. The size and characterization of biologically active organic carbon pool in soils[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(1): 56–63

[39] 张璐，张文菊，徐明岗，等．长期施肥对中国 3 种典型农田土壤活性有机碳库变化的影响[J]．中国农业科学，2009，42(5): 1646–1655

Zhang L, Zhang W J, Xu M G, et al. Effects of long-term fertilization on change of labile organic carbon in three typical upland soils of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(5): 1646–1655

[40] 唐宏亮，郭秋换，张春潮，等．磷供应对玉米根际微生物碳源利用和功能多样性的影响[J]．中国生态农业学报，2015，23(10): 1312–1319

Tang H L, Guo Q H, Zhang C C, et al. Effects of phosphorus supply on microbial carbon source utilization and functional diversity of maize rhizosphere[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(10): 1312–1319

[41] 任秀娥，童成立，孙中林，等．温度对不同粘粒含量稻田土壤有机碳矿化的影响[J]．应用生态学报，2007，18(10): 2245–2250

Ren X E, Tong C L, Sun Z L, et al. Effects of temperature on organic carbon mineralization in paddy soils with different clay content[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(10): 2245–2250